

УДК 665.2/3.067.7

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ, В ЕЛЕКТРОСЕПАРАТОРАХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СУСПЕНЗІЙ

Назаренко І.П., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел. (0619) 42-25-85

Анотація. В роботі надані результати математичного моделювання електричного поля, що обертається, в електросепараторах діелектричних суспензій. Здійснена візуалізація трифазного та чотирифазного електричних полів, що обертаються.

Ключові слова – електросепарація, частота, електрод, діелектрична суспензія, електричне поле, що обертається.

Постановка проблеми. Використання електричного поля, що обертається, та біжучого електричного поля в електросепараторах діелектричних суспензій засновано на різниці в електрофізичних властивостях дисперсійного середовища та дисперсної фази: діелектричній проникності та питомої електропровідності. Визначення електрофізичних характеристик середовища не є складною задачею. В літературних джерелах достатньо інформації, щодо електропровідності та діелектричній проникності очищених діелектричних рідин, таких як рослинні олії, трансформаторні масла, нафтопродукти та інші вуглеводневі рідини. На відміну від середовища, визначення характеристик зважених частинок є достатньо складною задачею з причини того, що видалення цих частинок з метою визначення їх властивостей традиційними методами приводить до зміни їх складу, стану, особливо, якщо вони мають біологічне походження. Тому доцільна розробка методів та технічних засобів визначення електрофізичних властивостей дисперсної фази безпосередню в суспензії.

Аналіз останніх досліджень. Для розділення діелектричних суспензій в електричних полях використовують різні підходи, але ж у всіх випадках процес залежить від різниці в електрофізичних властивостях дисперсійного середовища та дисперсної фази [1]. Зокрема в роботі [2] викладені результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу розділення суспензій в біжучому електричному полі на прикладі соняшникової олії з домішками шроту.

Авторами показано, що застосування двох біжучих в протилежних напрямках електричних полів дозволяє розділяти суспензії з різними електрофізичними характеристиками зважених частинок.

Для визначення електрофізичних властивостей речовин застосовують різні методи, зокрема, дієлькометрію [3], що як вказувалось вище, потребує відокремлення зважених частинок від рідкого середовища і тому не дозволяє вирішити поставлену задачу. Для визначення електрофізичних характеристик частинок можливе використання явища діелектрофорезу [4]. Але цей метод непридатний для слабопровідних рідин, крім того, він ускладнюється тим, що рух частинки здійснюється в неоднорідному електричному полі.

Формулювання цілей статті. Робота направлена на розробку математичної моделі електричного поля, що обертається для дослідження електричних властивостей діелектричних суспензій та обґрунтування параметрів електросепараторів з біжучим електричним полем та електричним полем, що обертається.

Основна частина. Якщо розглянути динаміку поступового руху діелектричної частинки в неоднорідному полі, то сила, що діє на частинку залежить від її положення, тому визначення електрофізичних параметрів частинки по динаміці її руху в неоднорідному полі ускладнюється. Якщо розглядати динаміку частинки у полі, що обертається, то вказане ускладнення відсутнє. Це витікає з формули для моменту сил, що діє на частинку в полі, що обертається:

$$M = \operatorname{Im} \left(4\pi R^3 \varepsilon_2 \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + j \left(\frac{\sigma_1}{2\pi f} - \frac{\sigma_2}{2\pi f} \right)}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 + j \left(\frac{\sigma_1}{2\pi f} + 2 \frac{\sigma_2}{2\pi f} \right)} \vec{E}^2 \right) \quad (1)$$

де R – радіус частинки, м;
 ε_1 – діелектрична проникність частинки, Ф/м;
 ε_2 – діелектрична проникність середовища, Ф/м;
 σ_1 – питома електропровідність частинки, Ом·м;
 σ_2 – питома електропровідність середовища, Ом·м;
 \vec{E} – напруженість електричного поля, В/м.
 f – частота, Гц.

Для створення електричного поля, що обертається, потрібно певним чином розташувати в просторі електроди. Відомо, що кількість електродів для цього повинна бути три і більше. Для створення симетричного поля ці електроди повинні встановлюватись вздовж кола. Наступною умовою створення електричного поля, що обертається, є зсув фаз між напругою, яка подається на електроди. Симетрія поля при цьому досягається рівним зсувом фаз між сусідніми електродами.

Симетричне поле, що обертається, значно спрощує фіксацію результатів спостереження та розрахунок динаміки з метою визначення електрофізичних характеристик зваженої частинки. Значною мірою на симетрію електричного поля, що обертається, впливає форма електродів. Як показано у роботі [5], електроди у вигляді гіперболічного циліндру мають осьову симетрію і дозволяють отримати електричне поле, що збільшується від центру пропорційно відстані. Тому нами розглянуто опис електричного поля, що обертається, для двох найпростіших випадків: три та чотири гіперболічних циліндри, що відповідає трифазному та чотирифазному полю, що обертається. Поле гіперболічного циліндру залежить від двох координат, тобто таке поле вважається плоским. Розрахунок будь якого плоского поля зводиться до рішення двомірного рівняння Лапласа при заданих крайових умовах, тобто знаходженню потенціалу $\varphi(x,y)$. Для вирішення задачі Діріхле скористаємося методами теорії функції комплексної змінної. Основна задача цього методу зводиться до того, щоб побудувати функцію, що здійснює конформне відображення області, комплексний потенціал, якої розшукується на область однакової зв'язності, комплексний потенціал якої відомий.

Області, що розглядаються, є однозв'язними з трьома та чотирма рукавами відповідно. Тому доцільно їх відобразити на внутрішність круга та верхню півплощину [6].

Позначимо різницю потенціалів між електродами як:

$$U_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}, \quad (2)$$

де φ_i – потенціал i – го електроду, В;

$$i = 1, 2, 3; \quad \varphi_0 = 0 \text{ В.}$$

При конформному відображенні електродної області на півплощину $\text{Im } \dot{z} > 0$ потенціал електричного поля являє собою дійсну частину комплексного потенціалу:

$$W(\dot{z}) = \frac{j}{\pi} \sum_{i=1}^N U_i \cdot \ln(\dot{z} - a_i), \quad (3)$$

де a_i – точки дійсної вісі, на які відображаються рукава смуги обмежені електродами;

Для відображення півплощини $\text{Im } \dot{z} > 0$ на круг $|\omega| < 1$ виконаємо дрібно – лінійне перетворення:

$$\omega = \frac{z-j}{z+j}, \quad (4)$$

яке приводить до наступної залежності комплексного потенціалу W від координат:

$$W(\dot{z}) = \frac{j}{\pi} \sum_{i=1}^N U_i \cdot \ln\left(1 - \frac{\theta(z)}{c_i}\right), \quad (5)$$

де $\theta(z)$ – функція, що здійснює конформне відображення області на одиничний круг;

c_i - координати точки одиничного кола, на які відображаються точки a_i .

Для створення трифазного електричного поля, що обертається, використовуємо електроди в формі узагальненої гіперболи третього порядку. Функція, що відображає криволінійну полосу, яка обмежена гіперболою третього порядку на одиничний круг $|\theta| < 1$ [7]:

$$\theta = \frac{z}{(1+z^3)^{1/3}}. \quad (6)$$

Для узагальненої гіперболи третього порядку з відповідною віссю симетрії того ж порядку координати точки одиничного кола, на які відображаються точки a_i , що відповідають рукавам електродної області складають:

$$c_i = e^{j\frac{2}{3}\pi(i-1)}, \quad (7)$$

де $i = 1, 2, 3$.

Таким чином, кут між електродами складає 120° .

Для забезпечення електричного поля, що обертається, кут зсуву фаз між напругою електродів повинен також складати 120° :

$$U_i = U \sin\left(2\pi f + \frac{2}{3}\pi(i-1)\right), \quad (8)$$

Використовуючи формули (5),(6),(7),(8), отримуємо вираз, який описує трифазне електричне поле, що обертається:

$$W(z) = \frac{j}{\pi} U \left(\sin(2\pi f) \cdot \ln\left(1 - \frac{z}{(1+z^3)^{1/3} \cdot e^{j0}}\right) + \sin\left(2\pi f + \frac{2}{3}\pi\right) \cdot \ln\left(1 - \frac{z}{(1+z^3)^{1/3} \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi}}\right) + \sin\left(2\pi f + \frac{4}{3}\pi\right) \cdot \ln\left(1 - \frac{z}{(1+z^3)^{1/3} \cdot e^{j\frac{4}{3}\pi}}\right) \right) \quad (9)$$

Використовуємо викладену методику розрахунку для чотири-фазного електричного поля, що обертається. При цьому врахуємо, що функція, яка відображає криволінійну смугу, обмежену гіперболою четвертого порядку на одиничний круг $|\theta| < 1$ має вигляд:

$$\theta = \frac{z}{(1+z^4)^{1/4}}. \quad (10)$$

Для узагальненої гіперболи четвертого порядку координати точки одиничного кола, на які відображаються точки a_i , складають:

$$c_i = e^{j\frac{1}{2}\pi(i-1)}, \quad (11)$$

де $i = 1, 2, 3, 4$.

Для забезпечення електричного поля, що обертається, кут зсуву фаз між напругою електродів повинен складати 90° :

$$U_i = U \sin\left(2\pi f + \frac{1}{2}\pi(i-1)\right), \quad (12)$$

Візуалізація поля, що описується формулою (9), здійснювалась за допомогою програмних засобів системи «Matlab». Силкові та еквіпотенційні лінії цього поля показані на рисунку 1.

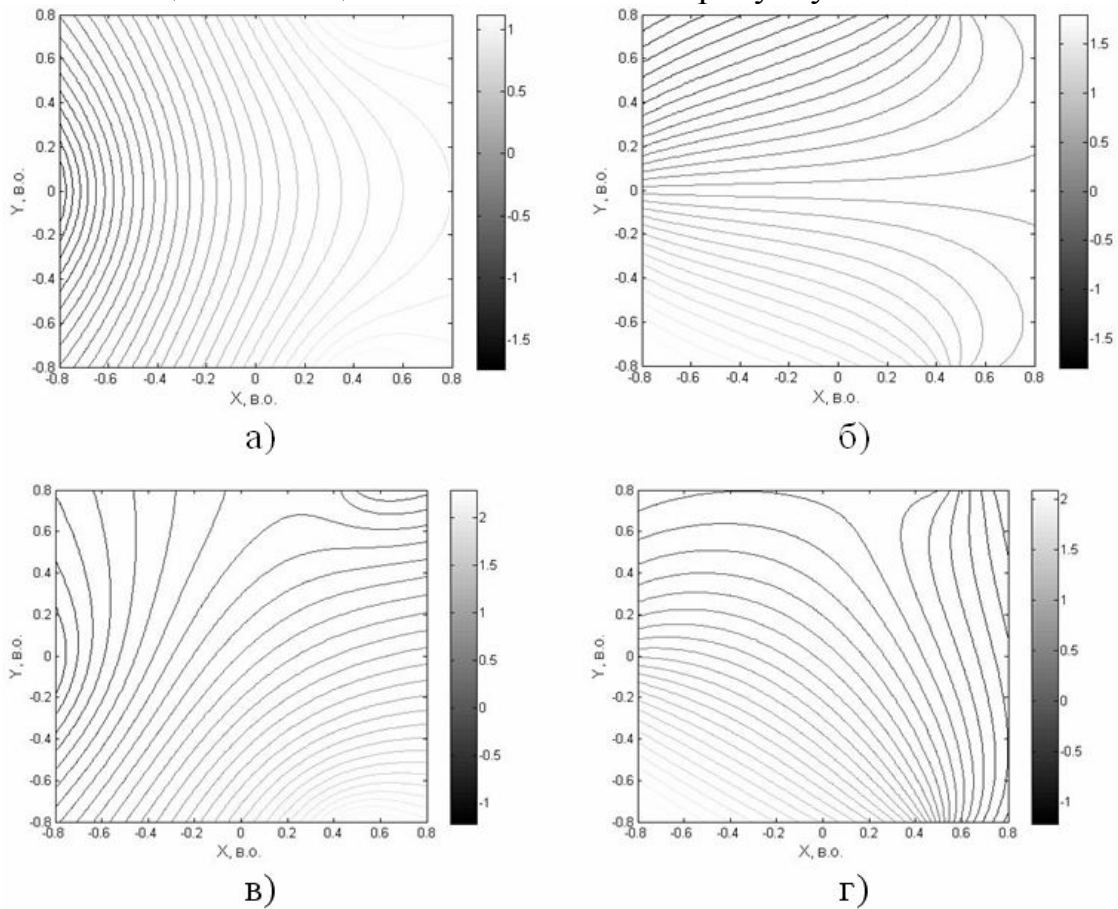


Рис.1. Трифазне електричне поле, що обертається: а - еквіпотенційні лінії при куті 0^0 ; б - силкові лінії при куті 0^0 ; в - еквіпотенційні лінії при куті 45^0 ; г - силкові лінії при куті 45^0 .

На підставі формул (5),(10),(11),(12), отримуємо вираз, який описує чотирифазне електричне поле, що обертається:

$$\begin{aligned}
 W(z) = & \frac{j}{\pi} U \left(\sin(2\pi f) \cdot \ln \left(1 - \frac{z}{(1+z^4)^{1/4} \cdot e^{j0}} \right) + \sin \left(2\pi f + \frac{1}{2}\pi \right) \cdot \right. \\
 & \ln \left(1 - \frac{z}{(1+z^4)^{1/4} \cdot e^{j\frac{1}{2}\pi}} \right) + \sin(2\pi f + \pi) \cdot \ln \left(1 - \frac{z}{(1+z^4)^{1/4} \cdot e^{j\pi}} \right) + \\
 & \left. \sin \left(2\pi f + \frac{3}{2}\pi \right) \cdot \ln \left(1 - \frac{z}{(1+z^4)^{1/4} \cdot e^{j\frac{3}{2}\pi}} \right) \right) \quad .(13)
 \end{aligned}$$

Силкові та еквіпотенційні лінії чотирифазного електричного поля, що обертається, показані на рисунку 2.

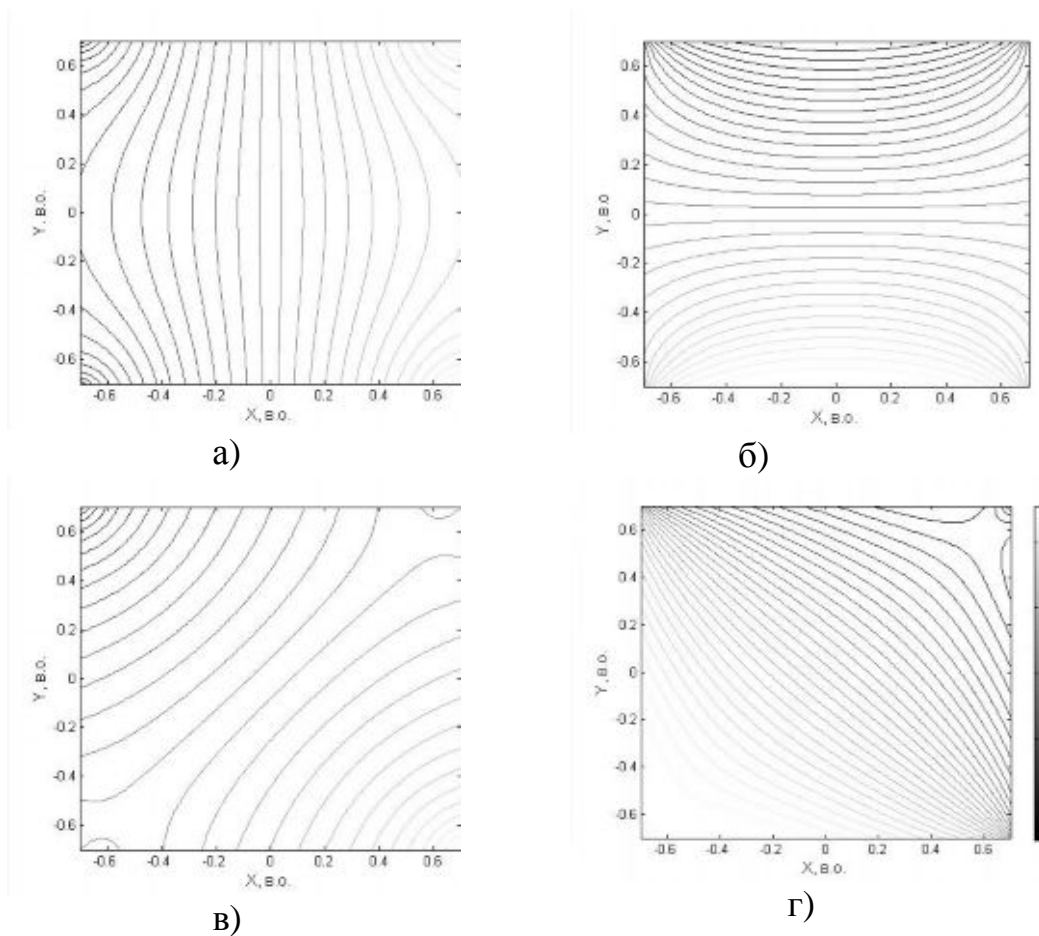


Рис.2. Чотирифазне електричне поле, що обертається: а - еквіпотенційні лінії при куті 0° ; б - силові лінії при куті 0° ; в - еквіпотенційні лінії при куті 45° ; г - силові лінії при куті 45° .

Висновки. Методи теорії функції комплексної змінної дозволили розрахувати електричне поле, що обертається. Розрахунок трифазного та чотирифазного електричного полів показав, що збільшення кількості полюсів дозволяє отримати більш однорідне електричне поле на вісі симетрії електродів. Електричне поле, що обертається, можна використовувати як для визначення електричних властивостей речовини, так і для електросепарації діелектричних суспензій. При визначенні електричних властивостей речовини дослідний зразок слід розташовувати в центрі камери.

Література

1. Эфендиев О.Ф. Электроочистка жидкости в пищевой промышленности / О.Ф. Эфендиев. – М.: Пищевая промышленность, 1977. –149с.
2. Назаренко І.П. Сепарація діелектричних суспензій в біжучому електричному полі / І.П. Назаренко // Науковий вісник

Національного університету біоресурсів і природокористування України / Редкол.: Д.О. Мельничук (відп. ред.) та ін. – К., 2010.- Вип.148.- С. 117-122.

3. Пиротти Е.Л., Мунтян В.А. Расчетные соотношения для определения электрофизических параметров веществ с использованием бисферического резонатора / Е.Л. Пиротти, В.А. Мунтян // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь: ТДАТА. – 2004. – Вып. 24. – С. 110 - 117.

4. Шилов В.Н. Диэлектрофорез наноразмерной частицы / В.Н. Шилов // Коллоидный журнал. – 2008.- т. 70. - №4. - С. 559 – 571.

5. Назаренко І.П. Теоретичні дослідження енергетичних показників камерного електросепаратора / І.П. Назаренко, М.О. Рубцов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. В. А. Дідур. - Мелітополь, 2009. - Вип. 9, т. 2. - С. 68-73.

6. Миролюбов Н.Н. Методы расчета электростатических полей / Н.Н. Миролюбов, М.В. Костенко, М.Л. Левинштейн, Н.Н. Тиходеев. – М.: Высшая школа, 1963. - 415 с.

7. Лаврентьев М.А. Методы теории функции комплексного переменного/ М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат.- М.: Наука, 1987. – 740 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРАХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СУСПЕНЗИЙ

И.П. Назаренко

Аннотация - в работе предоставлены результаты математического моделирования вращающегося электрического поля в электросепараторах диэлектрических суспензий. Осуществлена визуализация вращающихся трехфазного и четырехфазного электрических полей.

DESIGN OF ELECTRIC-FIELD WHICH IS REVOLVED, IN THE ELECTRO-SEPARATORS OF DIELECTRIC SUSPENSIOIDSS

I. Nazarenko

Summary

In work the results of mathematical design of the revolved electric field are given in the electric separators of dielectric suspension. Visualization of revolved three-phase and four-phase the electric fields are carried out.